doi:10.13866/j.azr.2019.05.10

新疆喀纳斯自然保护区森林碳储量及碳密度变化①

李园园[1,2]，　王　蕾[3]，　刘琪璟[1]，　周　华[4]

（1. 北京林业大学林学院，北京　100083；2. 石河子大学农学院林学系，新疆 石河子　832000；
3. 新疆林业科学院现代林业研究所，新疆 乌鲁木齐　830063；4. 贵州省林业科学研究院，贵州 贵阳　550000）

摘　要： 利用2009和2014年2期森林资源小班数据，结合地面样地调查，建立主要森林类型生物量—蓄积量转换方程，以此分析喀纳斯保护区森林乔木层地上碳储量及碳密度变化。结果表明：喀纳斯保护区5 a间森林面积增加了496.77 hm^2，碳储量约为2.14×10^6 Mg，平均碳密度由55.34 Mg·hm^{-2}减小至54.61 Mg·hm^{-2}，而不同森林类型的碳密度变化中，西伯利亚落叶松、西伯利亚红松和欧洲山杨碳密度减小，其余森林类型碳密度增大；保护区内成熟林碳储量最大，占乔木层地上总碳储量的63%以上，其余依次为过熟林、近熟林、中龄林和幼龄林，而碳密度最大的是中龄林（66.69～68.68 Mg·hm^{-2}），较小的是幼龄林（40.99～44.55 Mg·hm^{-2}），其余龄组碳密度为成、过熟林＞近熟林。其中，西伯利亚落叶松、西伯利亚冷杉、西伯利亚云杉和疣枝桦中龄林和近熟林碳密度增大，除西伯利亚红松和西伯利亚冷杉外，其余森林类型过熟林碳密度减小。经对比，该区森林乔木层碳密度高于全国平均水平，在我国干旱半干旱区是具有较强固碳潜力的区域。

关键词： 森林；碳储量；碳密度；固碳潜力；喀纳斯自然保护区；新疆

有关全球气候变化的研究中，陆地生态系统碳储量及其变化在全球碳循环和大气CO_2浓度变化中扮演着重要角色[1]。森林生态系统存储了86%的陆地植被碳[2-3]，因此，森林在全球碳收支中具有举足轻重的地位，并且决定了陆地碳循环的动态变化[4]。森林碳储量的正确评估可为区域森林资源的经营管理和全球碳循环及碳汇研究提供依据[5]。明确森林生态系统的固碳现状，对合理经营和管理森林，促进森林生态系统固碳功能的增加具有重要意义[6]，也是后续固碳速率、潜力及机制分析的重要基础，是理解森林生态系统在全球碳平衡和碳循环中所处地位的重要手段[7]。若想评估一个区域的森林“源汇”功能，需要在时间尺度上对森林生物量和碳储量的动态变化进行研究[8]。

森林生物量与陆地生态系统中碳循环、土壤养分分布和栖息地环境等密切相关[9]。为了准确评价区域内森林固碳增汇的数量和分布，精准估算森林生物量是十分必要的[10-11]。因此，对森林生物量的监测得到了世界各国的高度重视[12-13]。森林生物量可通过直接测量和间接估算两种途径得到[13]。直接测量主要是收获法，间接估算是利用生物量模型，包括异速生长方程和生物量—蓄积量模型及3S技术等方法进行估算，也有学者利用树木年轮方法，估算无法大规模破坏性取样的胡杨树干年新增生物量[14]。其中，生物量—蓄积量模型在大尺度森林生物量估算中应用较为广泛[15-17]，被认为是一种较好的估算森林生物量（碳储量）的方法。通过对大量森林实测生物量与蓄积量的研究，发现在各林分类型中二者之间存在着良好的回归关系[18-19]，这一方法弥补了平均生物量法所带来的一些人为差异。区域内丰富的森林资源清查资料是了解各类森林生物量准确信息的重要数据源[20]，以此来估算森林碳储量及碳密度动态变化具有现实意义[21]。

位于新疆北部的阿尔泰山，因其特殊的地理位置，是响应气候变化的敏感区域，也是阻止古尔班通古特沙漠北移的重要生态屏障[22]。喀纳斯自然保护区位于国家重点生态功能区—阿尔泰山地森林草原生态功能区，其自然环境和生态系统比较完整，与阿尔泰山植被垂直带谱基本一致[23]。目前，对于喀纳斯自然保护区森林植被的研究多集中在优势树种

①　**收稿日期：** 2018-12-17；　**修订日期：** 2019-04-08
基金项目： 国家高新技术发展计划（2013AA122003）；中国科学院战略性先导科技专项（XDA05050202）资助
作者简介： 李园园（1979-），女，在读博士，研究方向为林业遥感与信息技术. E-mail:2004liyy@163.com
通讯作者： 刘琪璟. E-mail: liuqijing@bjfu.edu.cn

生物量建模[24-25]、植被叶面积指数和景观格局的遥感监测[23,26]、森林群落格局及物种多样性分析[27-28],对于保护区内森林碳储量的研究相对比较薄弱[29],而森林碳储量和碳密度变化的研究鲜有报道。准确地估算该区域碳储量对于评估阿尔泰山森林碳储量以及制定森林资源管理措施具有重要意义。本文利用生物量—蓄积量转换方程,根据保护区2009年和2014年森林资源小班调查资料,估算喀纳斯保护区森林乔木层碳储量和碳密度,在此基础上分析碳储量和碳密度变化,旨在了解保护区森林乔木层的固碳潜力,为该区森林碳储量和碳循环的研究提供基础数据。

1 研究区概况

喀纳斯国家级自然保护区位于新疆阿勒泰地区布尔津县境内,北与哈萨克斯坦、俄罗斯接壤,东与蒙古毗连。地理坐标48°35′~49°11′N,86°54′~87°54′E,东西长74 km,南北宽约66 km,土地总面积2 201.62 km^2。保护区具有明显的大陆性气候特征,春秋温暖,冬季寒而不剧,全年无夏季。年平均气温-0.2 ℃,极端最高气温29.3 ℃,最低气温-37 ℃,气温年较差31.9 ℃。月平均气温低于0 ℃的时间可持续4个月,冬季长达7个月,≥5 ℃的年活动积温1 790.4 ℃,≥10 ℃的年活动积温1 595.4 ℃,年均降水量1 065.4 mm,年均蒸发量1 097 mm,相对湿度一般为59%~90%,全年日照时数2 157.4 h,无霜期80~108 d,常年盛行西南风,最大风力可达8级。该区的山地森林是我国惟有的西西伯利亚山地南泰加林生态系统的代表。森林群落建群种主要为西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ldb.)、西伯利亚云杉(*Picea obovata* Ldb.)、西伯利亚红松(*Pinus sibirica* Ldb.)、疣枝桦(*Betula pendula* Roth.),伴生的物种主要有欧洲山杨(*Populus tremula* L.)、西伯利亚冷杉(*Abies sibirica* Ldb.)以及西伯利亚花楸(*Sorbus sibirica* Hedl.)、刺蔷薇(*Rosa acicularis* L.)和多刺蔷薇(*R. spinosissima* L.)等乔灌木。

2 研究方法

2.1 资料来源及样地设置

本次研究主要依据喀纳斯自然保护区2009年和2014年的森林资源二类调查小班数据,记录了小班的优势树种、龄组、蓄积量、单位蓄积量等调查因子。该数据中森林被划分为5个龄组:幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林。为建立生物量—蓄积量模型,本研究根据二类调查资料中公布的6种森林类型,于2017年8月在保护区范围内选择具有代表性的各优势树种林分,设定坡面半径为9 m、面积≥200 m^{2}的圆形样地110个,起测径阶为胸径≥5 cm,在样地内进行每木检尺,测量胸径、树高等,样地基本情况见表1。

2.2 基于森林资源小班资料的乔木层地上碳储量估算

文中碳储量仅指林木地上的活生物量碳储量,并未包括森林生态系统中的枯死木、下木层、枯枝落叶层以及森林土壤层的碳库。每一优势树种的树干材积均按照树种和区域划分的材积表[30]。样地内所有样木的材积累加,得到样地林分水平的蓄积量。各样地内样木地上生物量参照表2的异速生长方程[24-25,31-33]进行计算,所有样木生物量总和乘以含碳率得到样地内乔木层碳储量。乔木层含碳率采用目前国际上常用的转换系数0.5[34]。

采用生物量—蓄积量转换关系法[15,18]推算森林资源小班资料中各森林类型乔木层生物量,公式如下:

$$B = aV + b$$

式中:B、V分别为单位面积生物量(Mg · hm^{-2})和蓄积量(m^3 · hm^{-2});a和b则为对应于森林类型的生物量—蓄积量转换方程的参数。

喀纳斯保护区各森林类型生物量—蓄积量转换参数见表3。由于样本量较小,本文采用留一交叉验证法对转换模型进行了验证,表3中列出了转换模型的参数值、标准误(SE)、拟合优度统计量以及模型的显著性。由表3可看出,各森林类型生物量转换模型在统计上都呈极显著($P<0.001$),均方根误差(Mg · hm^{-2})较低,且决定系数较高($R^2>0.98$)。

同时,对不同森林类型碳密度、不同龄组碳密度以及相同森林类型不同龄组碳密度在5 a间隔期间的变化进行差异显著性T检验。数据处理与分析通过Microsoft Excel 2013和SPSS 16.0完成,图形结果采用Origin 2018绘制。

表 1　样地基本情况

Tab. 1　Basic information of the sample plots

优势树种	统计量	胸径/cm	树高/m	地上生物量/($Mg \cdot hm^{-2}$)	蓄积量/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	样本量
西伯利亚落叶松	最小值	7.2	7.6	35.88	54.64	47
	最大值	57.6	29.7	367.18	627.37	
	平均值	27.29	18.36	169.35	282.34	
	标准差	15.17	6.78	82.91	139.82	
西伯利亚红松	最小值	5.0	8.3	7.84	12.12	30
	最大值	60.1	24.9	242.62	531.25	
	平均值	21.47	14.51	70.74	145.14	
	标准差	12.45	4.99	60.88	136.67	
西伯利亚冷杉	最小值	5.0	12.4	42.57	76.66	7
	最大值	68.7	18.5	192.45	415.50	
	平均值	21.37	15.36	85.85	178.40	
	标准差	12.11	2.35	48.94	110.86	
西伯利亚云杉	最小值	5.0	11.3	6.28	6.05	10
	最大值	62.5	16.3	102.75	154.61	
	平均值	12.03	12.95	37.92	55.62	
	标准差	7.31	1.97	32.45	51.06	
疣枝桦	最小值	5.0	4.0	5.93	15.64	12
	最大值	52.8	21	137.29	156.74	
	平均值	19.30	14.8	53.04	64.94	
	标准差	9.75	4.79	41.44	45.71	
欧洲山杨	最小值	6.4	9.5	23.43	29.99	4
	最大值	40.7	20	90.38	118.60	
	平均值	21.11	15.6	49.71	65.57	
	标准差	7.66	4.41	25.25	32.96	

表 2　优势树种异速生长方程

Tab. 2　Allometric equations for the dominant tree species

优势树种	生物量方程	样本量	R^2	参考文献
西伯利亚落叶松	$M_{aboveground}=0.093\,4\times D^{2.409\,7}$	54	0.961	〔31〕
	$M_{wood}=0.063\,2(D^2H)^{0.840\,9}$, $M_{branch}=0.013\,7(D^2H)^{0.817\,7}$			
西伯利亚红松	$M_{foliage}=0.020\,8(D^2H)^{0.652\,3}$, $M_{bark}=0.001\,9(D^2H)^{0.786\,8}$	9	0.971 ~ 0.999	〔24〕
西伯利亚冷杉	$M_{wood}=0.018(D^2H)^{0.958}$, $M_{branch}=0.045(D^2H)^{0.702}$	8	0.973 ~ 0.999	〔32〕
西伯利亚云杉	$M_{foliage}=0.209(D^2H)^{0.452}$, $M_{branch}=0.003(D^2H)^{0.955}$			
	$M_{aboveground}=0.188\,1\times D^{2.182\,8}$	50	0.978	〔25〕
疣枝桦	$M_{aboveground}=0.098\,7\times D^{1.867\,1}H^{0.674\,3}$	20	0.991	〔33〕
欧洲山杨	$M_{aboveground}=0.108\,9\times D^{2.399}$	30	0.993	〔33〕

注：D 为胸径(cm)；H 为树高(m)；$M_{aboveground}$ 为地上生物量(kg)；M_{wood} 为树干生物量(kg)；M_{branch} 为树枝生物量(kg)；$M_{foliage}$ 为树叶生物量(kg)；M_{bark} 为树皮生物量(kg)。

表 3　各森林类型林分生物量—蓄积量转换方程参数

Tab. 3　Parameters of biomass-volume conversion formula for different standing forests

森林类型	参数		N	RMSE	R^2	P
	a(SE)	b(SE)				
西伯利亚落叶松	0.592(0.000 1)	2.170(0.028)	47	4.572	0.997	<0.001
西伯利亚红松	0.444(0.000 3)	6.345(0.036)	30	5.852	0.992	<0.001
西伯利亚冷杉	0.438(0.004)	7.515(0.550)	7	4.541	0.998	<0.001
西伯利亚云杉	0.631(0.003)	2.815(0.154)	10	4.724	0.987	<0.001
疣枝桦	0.903(0.002)	-5.588(0.187)	12	4.515	0.991	<0.001
欧洲山杨	0.764(0.006)	-0.471(0.543)	4	1.824	0.998	<0.001

注：a，b 为转换参数；SE 为参数标准误；N 为样本量；RMSE 为均方根误差；R^2 为决定系数；P 为显著性水平。

3 结果与分析

3.1 主要森林类型碳储量及碳密度变化

2009—2014 年,喀纳斯保护区森林面积增加了 496.77 hm^2,乔木层碳储量约为 2.14×10^6 Mg,较 2009 年减少约 0.046%。2009 年乔木层平均碳密度为 55.34 $Mg\cdot hm^{-2}$,2014 年为 54.61 $Mg\cdot hm^{-2}$,碳密度降低约 1.32% (表 4)。西伯利亚落叶松林面积占森林总面积的 60% 以上,其次是西伯利亚红松林 (11.82% ~ 12.26%)、西伯利亚云杉林 (14.51% ~14.45%),西伯利亚冷杉林是针叶林中所占面积比例最小的(0.91% ~0.98%),疣枝桦林在阔叶林面积中占有绝对优势(8% 以上)。疣枝桦阔叶林的碳密度最高(75.20 ~75.7 $Mg\cdot hm^{-2}$),西伯利亚云杉针叶林碳密度达到 68.9 ~70.54 $Mg\cdot hm^{-2}$,其次是西伯利亚冷杉林(56.01 ~56.79 $Mg\cdot hm^{-2}$)和西伯利亚落叶松林(57.96 ~53.86 $Mg\cdot hm^{-2}$),西伯利亚红松林碳密度最低,只有 37.54 ~ 37.17 $Mg\cdot hm^{-2}$。其中,2014 年保护区西伯利亚落叶松林、西伯利亚红松林和欧洲山杨林的碳密度较 2009 年减小,而西伯利亚冷杉、西伯利亚云杉和疣枝桦的碳密度略有增大。通过独立样本 *T* 检验,2009 年和 2014 年不同森林类型碳密度变化无显著差异($P\geq0.05$)(图 1a)。

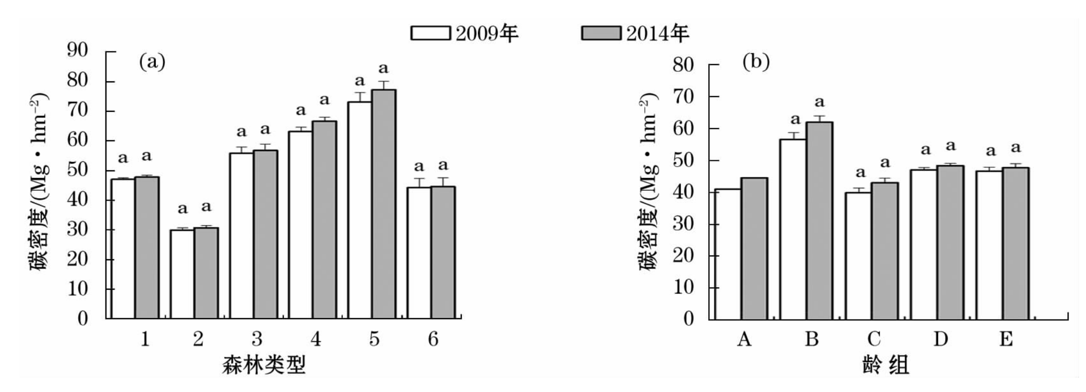
3.2 不同龄组碳储量与碳密度变化

喀纳斯保护区内成熟林所占面积最大(63.621% ~61.237%),其次为过熟林、近熟林和中龄林,所占面积最小的是幼龄林(表 5)。与 2009 年相比,2014 年幼龄林面积没有变化,而中龄林、近熟林和成熟林面积减少,过熟林面积增加。成熟林在保护区碳储量中占有主导地位,2009 年和 2014 年保护区内成熟林碳储量分别为 1.36×10^6 Mg 和 1.35×10^6 Mg,其余依次为过熟林、近熟林及中龄林,幼龄林的碳储量较小(46.74 ~50.78 Mg)。与

表 4 主要森林类型碳储量和碳密度

Tab.4 Carbon storages and carbon densities of the main forest types

森林类型	2009 年						2014 年					
	面积 /hm^2	百分比 /%	蓄积量 /m^3	碳储量 /Mg	百分比/%	碳密度 /($Mg\cdot hm^{-2}$)	面积 /hm^2	百分比 /%	蓄积量 /m^3	碳储量 /Mg	百分比/%	碳密度 /($Mg\cdot hm^{-2}$)
西伯利亚落叶松林	23 524.69	60.83	4 281 723	1 292 920.35	60.41	54.96	23 888.72	60.98	4 258 640.44	1 286 742.97	60.15	53.86
西伯利亚红松林	6 737.47	17.42	1 043 189	252 957.13	11.82	37.54	7 056.72	18.01	1 080 808	262 323.35	12.26	37.17
西伯利亚冷杉林	348.18	0.90	82 784	19 502.83	0.91	56.01	368.4	0.94	88 886.48	20 921.10	0.98	56.79
西伯利亚云杉林	4 507.34	11.66	962 850	310 576.29	14.51	68.90	4 381.84	11.19	958 675.4	309 080.38	14.45	70.54
疣枝桦林	3 467.84	8.97	599 061	260 781.01	12.18	75.20	3 397.78	8.67	590 763.1	257 229.34	12.02	75.70
欧洲山杨林	89.47	0.23	9 214	3 503.24	0.16	39.16	78.3	0.20	7 784.88	2 959.27	0.14	37.79
总和/平均	38 674.99	100	6 978 821	2 140 240.85	100	55.34	39 171.76	100	6 985 558.30	2 139 256.41	100	54.61



注:1 ~6 分别代表西伯利亚落叶松林、西伯利亚红松林、西伯利亚冷杉林、西伯利亚云杉林、疣枝桦林和欧洲山杨林;A ~E 分别代表幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林。误差线代表标准误,相同字母表示差异不显著($P\geq0.05$)。图中没有标注字母的表示样本量太少,无法进行独立样本 *T* 检验。下同。

图 1 不同森林类型和不同龄组碳密度差异

Fig.1 Differences of carbon density for different forest types and tree-aged groups

表 5　不同龄组碳储量和碳密度变化

Tab. 5　Carbon storages and carbon densities of different tree-aged groups

年份	龄组	面积/hm²	百分比/%	碳储量/Mg	百分比/%	碳密度/(Mg·hm⁻²)
2009	幼龄林	1.14	0.003	46.74	0.002	40.99
	中龄林	2 357.70	6.096	157 231.31	7.346	66.69
	近熟林	6 229.15	16.106	298 926.25	13.967	47.99
	成熟林	24 354.97	62.974	1 361 635.51	63.621	55.91
	过熟林	5 732.03	14.821	322 401.04	15.064	56.24
	合计	38 674.99	100	2 140 240.85	100	55.34
2014	幼龄林	1.14	0.003	50.78	0.002	44.55
	中龄林	2 357.77	6.019	161 943.25	7.57	68.68
	近熟林	6 040.11	15.42	283 881.97	13.27	47.00
	成熟林	24 461.64	62.447	1 352 794.78	63.237	55.30
	过熟林	6 311.10	16.111	340 585.63	15.921	53.97
	合计	39 171.76	100	2 139 256.41	100	54.61

2009 年相比,2014 年幼龄林、中龄林和过熟林碳储量增加,而近熟林和成熟林碳储量减少。碳储量随龄组分布不同,喀纳斯保护区内碳密度最大的是中龄林(66.69 ~ 68.68 Mg·hm^{-2}),较小的是幼龄林(40.99 ~ 44.55 Mg·hm^{-2}),其余各龄组碳密度为成、过熟林 > 近熟林。与 2009 年相比,2014 年幼龄林、中龄林碳密度增大,而近熟林、成熟林和过熟林减小。通过独立样本 T 检验,2009 年和 2014 年不同龄组碳密度变化均没有显著差异($P \geq 0.05$)(图 1b)。

3.3　主要森林类型不同龄组碳储量和碳密度变化

喀纳斯保护区内主要森林类型碳储量和碳密度在各龄组中的分配是不平衡的(表 6)。西伯利亚落叶松林成熟林、过熟林面积和碳储量在两次清查中分别占喀纳斯保护区总量的 60.569%、60.737% 和 60.166%、59.907%,不同龄组碳密度差异较大,中龄林碳密度(56.14 Mg·hm^{-2}和 57.30 Mg·hm^{-2})大于成、过熟林,而近熟林的碳密度最小(42.23 Mg·hm^{-2}和 42.72 Mg·hm^{-2})。西伯利亚红松近、成、过熟林面积比例由 17.059% 增加到 17.638%,碳储量由 2.47×10^5 Mg 增加到 2.56×10^5 Mg,过熟林碳密度最小(22.78 ~ 22.95 Mg·hm^{-2}),其中中龄林和过熟林碳密度增大,近熟林和成熟林碳密度减小。西伯利亚冷杉以成熟林碳储量较大,占到保护区总碳储量的 0.650% ~ 0.684%,不同龄组碳密度在 5 a 间是增大的。西伯利亚云杉除成熟林碳密度在 5 a 间由 68.37 Mg·hm^{-2}降低到 64.08 Mg·hm^{-2},其他龄组均增大。对于保护区内的阔叶树,疣枝桦所占面积是欧洲山杨的 38 倍,而碳储量是其 75 倍。随着龄组的增加,疣枝桦的碳密度增大,以过熟林碳密度最高,达到 105.92 ~ 105.88 Mg·hm^{-2}。欧洲山杨成熟林碳密度在 5 a 间减小。同时比较了调查期内主要森林类型相同龄组碳密度变化的差异性(图 2),差异显著性检验表明,主要森林类型碳密度的变化均没有显著差异($P \geq 0.05$)。

4　讨 论

4.1　喀纳斯保护区森林碳储量和碳密度变化特征

区域内不同森林类型碳库的主要驱动力是各类型活生物量的动态变化[35],而森林的碳动态在很大程度上取决于其龄组的变化[8]。森林对碳的积累是一个连续的过程,不同森林类型对碳积累的速率不同,这种积累是随着森林的生长过程而发生的变化,即通过不同龄组碳密度来反映。喀纳斯保护区乔木层不同龄组碳密度变化中,低龄组碳密度在 5 a 间增大,成熟林和过熟林碳密度减小(表 5)。有研究表明,成熟林以后的树木碳密度增加极为缓慢,其生物碳的积累和消耗几乎达到平衡,在这个龄组阶段的树木作为碳汇功能的能力已经开始下降[36],即随着过熟林的死亡和分解,区域森林碳储量减少。另一方面,幼龄林、中龄林过渡到近熟林和成熟林,又使得森林碳储量增加。喀纳斯保护区成熟林和过熟林面积占乔木林总面积的 77.795% ~ 78.558%,对应的碳储量占到乔木林总碳储量的 78.685% ~ 79.158%,与其森林面积比例基本一致(表 5)。有

表 6　主要森林类型不同龄组碳储量和碳密度

Tab. 6　Carbon storages and carbon densities of different tree-aged groups of the main forest types

森林类型	龄组	2009 年					2014 年				
		面积 /hm²	百分比 /%	碳储量 /Mg	百分比 /%	碳密度 /(Mg·hm⁻²)	面积 /hm²	百分比 /%	碳储量 /Mg	百分比 /%	碳密度 /(Mg·hm⁻²)
西伯利亚落叶松林	中龄林	75.55	0.195	4 242.50	0.198	56.14	72.14	0.184	4 133.54	0.193	57.30
	近熟林	24.12	0.062	1 018.58	0.048	42.23	24.77	0.063	1 058.27	0.049	42.72
	成熟林	18 071.55	46.727	985 404.68	46.042	54.53	17 846.18	45.559	960 264.33	44.888	53.81
	过熟林	5 353.47	13.842	302 255.61	14.122	56.46	5 945.63	15.178	321 286.83	15.019	54.04
西伯利亚红松林	中龄林	140.06	0.362	5 945.13	0.278	42.45	147.60	0.377	6 386.64	0.299	43.27
	近熟林	3 836.11	9.919	130 493.30	6.097	34.02	3 932.39	10.039	131 923.45	6.167	33.55
	成熟林	2 594.70	6.709	112 723.76	5.267	43.44	2 812.29	7.179	120 239.50	5.621	42.75
	过熟林	166.60	0.431	3 794.93	0.177	22.78	164.44	0.420	3 773.75	0.176	22.95
西伯利亚冷杉林	中龄林	19.06	0.049	1 114.86	0.052	58.49	18.82	0.048	1 139.04	0.053	60.52
	近熟林	89.81	0.232	4 480.62	0.209	49.89	101.29	0.259	5 158.04	0.241	50.92
	成熟林	239.31	0.619	13 907.35	0.650	58.11	248.29	0.634	14 624.03	0.684	58.90
西伯利亚云杉林	中龄林	2 118.82	5.479	145 720.71	6.809	68.77	2 114.78	5.399	150 053.08	7.014	70.95
	近熟林	1 559.43	4.032	109 761.13	5.128	70.38	1 416.80	3.617	101 385.54	4.739	71.56
	成熟林	820.36	2.121	54 497.51	2.546	66.43	840.01	2.144	56 984.95	2.664	67.84
	过熟林	8.73	0.023	596.94	0.028	68.37	10.25	0.026	656.81	0.031	64.08
疣枝桦林	幼龄林	1.14	0.003	46.74	0.002	40.99	1.14	0.003	50.78	0.002	44.55
	中龄林	4.21	0.011	209.13	0.010	49.67	4.43	0.011	230.95	0.011	52.13
	近熟林	718.61	1.858	53 136.03	2.483	73.94	564.86	1.442	44 356.68	2.073	78.53
	成熟林	2 627.03	6.793	195 012.28	8.112	74.23	2 714.87	6.931	200 681.97	9.381	73.92
	过熟林	116.85	0.302	12 376.83	0.578	105.92	112.48	0.287	11 908.96	0.557	105.88
欧洲山杨林	近熟林	1.07	0.003	36.58	0.002	34.19	–	–	–	–	–
	成熟林	2.02	0.005	89.92	0.004	44.52	–	–	–	–	–
	过熟林	86.38	0.223	3 376.73	0.158	39.09	78.3	0.200	2 959.27	0.138	37.79
总和		38 674.99	100	2 140 241.85	100	55.34	39 171.76	100	2 139 256.41	100	54.61

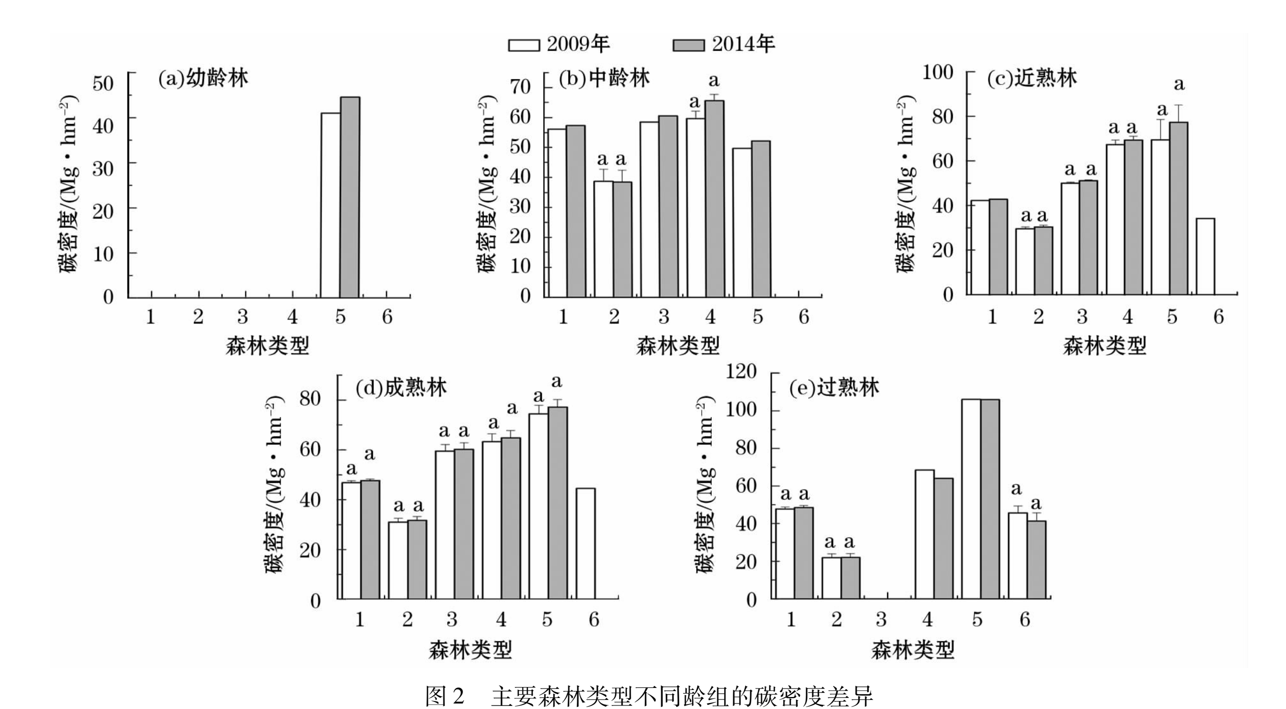


图 2　主要森林类型不同龄组的碳密度差异

Fig. 2　Differences of carbon densities of different tree-aged groups of the main forest types

些区域尽管老龄林地上部分碳密度下降,但林下土壤碳库储量却很大[37],尤其是针叶林[38]。郑栓丽等[39]利用森林资源清查数据和样地实测数据估算了新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量,结果表明土壤层和乔木层碳储量分别占阿尔泰山森林生态系统总碳储量的66%和33%,同时在乔木各器官中,树根所占生物量比例约为22%,并且随着龄组的增加,根系碳密度也在增加。因此,维持老龄林对陆地碳循环的影响效应要高于幼龄林。天然林生态系统的碳储量是处于波动状态的,空间上这种"斑块状"的生物碳储量的消长变化是顶级森林群落碳库的自然状态,即在没有人为干扰的情况下,喀纳斯保护区内森林总碳储量是相对稳定的——小尺度范围内碳储量的增加或减少,大尺度上碳储量保持相对稳定。

4.2 森林碳储量和碳密度估算不确定性分析

在森林碳储量估算研究中,由于采样和分析方法的不同容易产生估算偏差[40],而使用资料或者假设条件的不同导致以往关于森林源汇作用的研究结果差异较大[41]。其中,包括生物量模型对森林植被碳储量估算结果的影响[6]和林龄对林木蓄积量与生物量之间的关系的影响[42]。同样基于森林资源小班数据,本研究估算的乔木林平均碳密度(55.34 $Mg\cdot hm^{-2}$)与方岳等[29]的估算结果差异较大(68.87 $Mg\cdot hm^{-2}$)。这是因为后者估算的乔木林碳密度包括地上和地下两部分,而本研究中仅指地上部分,同时二者所用的生物量—蓄积量转换方程也是不一样的。本研究中建立的生物量—蓄积量模型估算所得西伯利亚红松林过熟林碳密度为22.78~22.95 $Mg\cdot hm^{-2}$(表6),这与相关研究差异较大[43]。但森林生态系统具有复杂性与多样性,不同森林类型甚至同一森林类型在不同气候等条件下,植被的碳密度均有差异[44-45]。由于海拔高度相差悬殊,在复杂的地形和水热条件的影响下,西伯利亚红松适宜的生长海拔为1 600~2 300 m,到了海拔2 200~2 400 m,西伯利亚红松生长成灌丛状,在阴坡半阴坡处高度只有1~2 m,导致其地上碳密度较小。因此,在进行区域森林碳储量和碳密度估算研究中,建议采用区域的参数和按类型或区域进行详尽的统计,以减少估算的不确定性。

4.3 喀纳斯保护区森林资源的固碳潜力

随着全球气候变暖的日益加剧,森林生态系统在陆地生态系统碳平衡中是扮演"碳源"还是"碳汇"的角色引起学者们的广泛关注。喀纳斯保护区处于高纬度地区,该区山地森林属于寒温带针叶林区,尽管该区森林面积并不大,但对区域生态和绿洲稳定性发挥着重要作用,同时该区森林生物碳储量及固碳潜力的研究将有助于我们了解森林生态系统的碳汇功能,对于解释中高纬度地区迷失的"碳汇"问题具有现实意义[46]。方精云等[41]利用全国森林资源清查数据和生物量—蓄积量转换模型,得到全国天然林和次生林碳密度约为48.75 $Mg\cdot hm^{-2}$(1994—1998年,包括地上和地下),低于喀纳斯保护区乔木层碳密度(55.34~54.61 $Mg\cdot hm^{-2}$,仅地上)(表4)。喀纳斯保护区的优势树种西伯利亚落叶松碳密度也较东北大兴安岭地区的兴安落叶松地上碳密度高(32.045 $Mg\cdot hm^{-2}$)[11]。而徐新良等[47]利用相关资料,估算得到我国干旱、半干旱的西北地区森林碳密度是41.38 $Mg\cdot hm^{-2}$(1999—2003年),而喀纳斯保护区的森林碳密度远远高于该值。森林生态系统碳储量由植被层、土壤层和凋落物层组成,而本文仅仅以乔木层为研究对象,对两期森林资源小班数据估算的森林乔木层碳储量和碳密度进行了简单对比,认为喀纳斯保护区森林乔木层固碳潜力是相对稳定的,应该进一步加强区域内森林资源的保护。

参考文献(References):

[1] Kerang L I, Wang S A. Vegetation and soil carbon storage in China[J]. Science in China, 2004, 47(1): 49-57.

[2] Brown S L, Schroeder P, Kern J S. Spatial distribution of biomass in forests of the Eastern USA[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 123(1): 81-90.

[3] Fleming A L, Wang G, Mcroberts R E. Comparison of methods toward multi-scale forest carbon mapping and spatial uncertainty analysis: Combining national forest inventory plot data and landsat TM images[J]. European Journal of Forest Research, 2015, 134(1): 125-137.

[4] Dong J, Kaufmann R K, Myneni R B, et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: Carbon pools, sources, and sinks[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 393-410.

[5] 杨晓菲,鲁绍伟,饶良懿,等. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 73-78. [Yang Xiaofei, Lu Shaowei, Rao Liangyi, et al. Advance in the researches of carbon storage of forest ecology and related facors in China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 73-78.]

〔6〕 王新闯,齐光,于大炮,等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布〔J〕. 应用生态学报,2011,22(8):2 013 – 2 020. 〔Wang Xinchuang, Qi Guang, Yu Dapao, et al. Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of northeast China〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(8):2 013 – 2 020.〕

〔7〕 崔高阳,陈云明,曹扬,等. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析〔J〕. 植物生态学报,2015,39(4):333 – 342.〔Cui Gaoyang, Chen Yunming, Cao Yang, et al. Analysis on carbon stock distribution patterns of forest ecosystems in Shaanxi Province〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2015,39(4):333 – 342.〕

〔8〕 刘国华,傅伯杰,方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献〔J〕. 生态学报,2000,20(5):733 – 740.〔Liu Guohua, Fu Bojie, Fang Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2000,20(5):733 – 740.〕

〔9〕 Lu D S. Aboveground biomass estimation using landsat TM data in the Brazilian Amazon〔J〕. International Journal of Remote Sensing, 2005,26(12):2 509 – 2 525.

〔10〕 Wang X P, Fang J Y, Zhu B. Forest biomass and root-shoot allocation in northeast China〔J〕. Forest Ecology and Management, 2008,255(12):4 007 – 4 020.

〔11〕 Meng S W, Liu Q J, Jia Q Q, et al. Spatial distribution and dynamics of carbon storage in natural *Larix gmelinii* forest in Daxing'anling mountains of Inner Mongolia, Northeastern China〔J〕. Journal of Mountain Science,2017,14(8):1 633 – 1 641.

〔12〕 Thurner M, Beer C, Santoro M, et al. Carbon stock and density of northern boreal and temperate forests〔J〕. Global Ecology and Biogeography,2014,23(3):297 – 310.

〔13〕 罗云建,张小全,王效科,等. 森林生物量的估算方法及其研究进展〔J〕. 林业科学,2009,45(8):129 – 134.〔Luo Yunjian, Zhang Xiaoquan, Wang Xiaoke, et al. Forest biomass estimation methods and their prospects〔J〕. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(8):129 – 134.〕

〔14〕 黄运梅,徐海量,张广朋,等. 基于年轮信息的单株胡杨(*Populus euphratica*)树干年新增生物量估算方法〔J〕. 干旱区研究, 2018,35(4):905 – 911.〔Huang Yunmei, Xu Hailiang, Zhang Guangpeng, et al. Estimation of annual biomass of individual *Populus euphratica* based on Tree-ring data〔J〕. Arid Zone Research, 2018,35(4):905 – 911.〕

〔15〕 Fang J Y, Wang G G, Liu G H, et al. Forest biomass of China: An estimate based on the biomass-volume relationship〔J〕. Ecological Applications,1998,8(4):1 084 – 1 091.

〔16〕 Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, et al. New estimated of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation〔J〕. Climatic Change,2004,67:211 – 236.

〔17〕 郝丽,徐娟娟,翟园,等. 近 30 a 陕西省森林植被碳储量及其动态变化〔J〕. 干旱区研究,2017,34(5):1 056 – 1 062.〔Hao Li, Xu Juanjuan, Zhai Yuan, et al. Forest carbon storage and its dynamic changes in Shaanxi province in recent 30 years〔J〕. Arid Zone Research,2017,34(5):1 056 – 1 062.〕

〔18〕 方精云,刘国华,徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量〔J〕. 生态学报,1996,16(5):497 – 508.〔Fang Jingyun, Liu Guohua, Xu Songling. Biomass and net production production of forest vegetation in China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,1996,16(5):497 – 508.〕

〔19〕 Brown S, Gillespie A J R, Lugo A E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data〔J〕. Forest Science,1989,35:881 – 902.

〔20〕 Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity in major planted forests in China based on forest inventory data〔J〕. Forest Ecology and Management,2005,207(3):295 – 313.

〔21〕 王玉辉,周广胜,蒋延玲,等. 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式〔J〕. 植物生态学报,2001,25(4):420 – 425.〔Wang Yuhui, Zhou Guangsheng, Jiang Yanling, et al. Estimating biomass and npp of *Larix* forests using forest inventory data〔J〕. Acta Phytoecologica Sinica,2001,25(4):420 – 425.〕

〔22〕 Ni J. Forest productivity of the Altay and Tianshan Mountains in the dryland, northwestern China〔J〕. Forest Ecology and Management,2004,202(10):13 – 22.

〔23〕 昝梅,李登秋,居为民,等. 基于 HJ-CCD 影像数据的新疆喀纳斯自然保护区植被叶面积指数估算〔J〕. 冰川冻土,2013,35(4):892 – 903.〔Zan Mei, Li Dengqiu, Ju Weimin, et al. Retrieval of vegetation leaf area index in Kanas National Nature Reserve, Xinjiang, based on HJ-CCD remote sensing data〔J〕. Journal of Glaciology & Geocryology,2013,35(4):892 – 903.〕

〔24〕 白志强,刘华,方岳,等. 喀纳斯国家自然保护区针叶林生物量分配特征〔J〕. 河北农业大学学报,2014,37(4):14 – 19.〔Bai Zhiqiang, Liu Hua, Fang Yue, et al. The biomass distribution pattern of coniferous forest in the Kanas National Nature Reserve〔J〕. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37(4): 14 – 19.〕

〔25〕 张绘芳,高亚琪,李霞,等. 新疆西伯利亚云杉生物量模型研究〔J〕. 中南林业科技大学学报,2015,35(11):115 – 120.〔Zhang Huifang, Gao Yaqi, Li Xia, et al. Research on biomass model of *Picea obovata* in Xinjiang〔J〕. Journal of Central South University of Forestry and Technology,2015,35(11):115 – 120.〕

〔26〕 刘新宇,杨兆萍,马忠国,等. 基于地形因子的喀纳斯自然保护区土地利用/覆被现状格局分析〔J〕. 干旱区地理,2011,34(5):851 – 857.〔Liu Xinyu, Yang Zhaoping, Ma Zhongguo, et al. Land use and land cover pattern in Kanas Natural Reserve based on terrain factors〔J〕. Arid Land Geography,2011,34(5):851 – 857.〕

〔27〕 刘翠玲,潘存德,巴扎尔别克·阿斯勒汗,等. 自然火干扰对新疆喀纳斯旅游区森林景观树种结构的影响〔J〕. 植物生态学报,2009,33(3):555 – 562.〔Liu Cuiling, Pan Cunde, Bazhaerbieke Asiliehan, et al. Effects of natural fire disturbance on struc-

ture of tree species in species in Kansas tourism district, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(3): 555 – 562.]

[28] 程平,潘存德,朱跃峰,等. 新疆喀纳斯旅游区森林群落格局分析及其环境解释[J]. 新疆农业大学学报, 2011, 34(5): 367 – 373. [Cheng Ping, Pan Cunde, Zhu Yuefeng, et al. Pattern Analysis and environment interpretation on forest community in Kanas Tourist Areas, Xinjiang[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2011, 34(5): 367 – 373.]

[29] 方岳,刘华,白志强,等. 新疆喀纳斯保护区森林碳储量及碳密度研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6): 17 – 22. [Fang Yue, Liu Hua, Bai Zhiqiang, et al. Spatial pattern of carbon storage and carbon density in forest vegetation of the Kanas National Natural Reserve[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(6): 17 – 22.]

[30] 刘琪璟. 中国立木材积表[M]. 北京:中国林业出版社, 2017: 1 071 – 1 084. [Liu Qijing. China's Timber Volume Table[M]. Beijing: China Forestry Press, 2017: 1 071 – 1 084.]

[31] 高亚琪,张绘芳,朱雅丽,等. 西伯利亚落叶松天然林立木生物量估算模型研究[J]. 新疆农业科学, 2016, 53(4): 655 – 662. [Gao Yaqi, Zhang Huifang, Zhu Yali, et al. Research on natural *Larix sibirica* buck biomass estimation model in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2016, 53(4): 655 – 662.]

[32] 胡莎莎. 新疆典型森林类型生物量监测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012. [Hu Shasha. Monitoring Research on the Biomass of Typical of Main Forest Types in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.]

[33] 张绘芳,地力夏提·包尔汉,朱雅丽,等. 新疆疣枝桦与欧洲山杨生物量分配与异速生长模型分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(5): 33 – 38. [Zhang Huifang, Dilixiati Baoerhan, Zhu Yali, et al. Biomass allocationpatterns and allometric models of *Betula pendula* and *Populus tremulain* Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(5): 33 – 38.]

[34] Basuki T M, van Laake P E, Skidmore A K, et al. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(8): 1 684 – 1 694.

[35] Turner D P, Koerper G J, Harmon M E, et al. A carbon budget for forests of the conterminous United States[J]. Ecological Applications, 1995, 5(2): 421 – 436.

[36] 刘华,侯琳,雷瑞德. 秦岭火地塘林区油松和华山松林的空间分布格局及碳储量与碳密度研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 5 – 8. [Liu Hua, Hou Lin, Lei Ruide. Carbon storage and carbon density of *Pinus tabulaeformis* and *Pinus armandii* forests at Huoditang forest region in Qinling Mountain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 5 – 8.]

[37] Zhou G Y, Liu S G, Li Z A, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. Science, 2006, 314(5 804): 1 417.

[38] 王鑫,杨德刚,熊黑钢,等. 新疆不同植被类型土壤有机碳特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 782 – 788. [Wang Xin, Yang Degang, Xiong Heigang, et al. Characteristics of soil organic carbon under different vegetation types in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(4): 782 – 788.]

[39] 郑拴丽,许文强,杨辽,等. 新疆阿尔泰山森林生态系统碳密度与碳储量估算[J]. 自然资源学报, 2016, 31(9): 1 553 – 1 563. [Zheng Shuanli, Xu Wenqiang, Yang Liao, et al. Carbon density and storage of forest ecosystem in Altay Mountains, Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1 553 – 1 563.]

[40] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518 – 522. [Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and buget of major Chinese forest types[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2000, 24(5): 518 – 522.]

[41] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001, 43(9): 967 – 973. [Fang Jingyun, Chen Anping. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance[J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(9): 967 – 973.]

[42] 王效科,冯宗炜,欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13 – 16. [Wang Xiaoke, Feng Zongwei, Ouyang Zhiyun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 13 – 16.]

[43] 王效科,冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力[J]. 生态学杂志, 2000, 1(4): 72 – 74. [Wang Xiaoke, Feng Zongwei. The potential of sequester atmosperic caron through forest ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 1(4): 72 – 74.]

[44] 胡海清,罗碧珍,魏书精,等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2): 140 – 158. [Hu Haiqing, Luo Bizhen, Wei Shujing, et al. Biomass carbon density and carbon sequestration capacity in seven typical forest types of the Xiaoxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(2): 140 – 158.]

[45] Dulamsuren C, Klinge M, Degener J, et al. Carbon pool densities and a first estimate of the total carbon pool in the Mongolian forest-steppe[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 830 – 844.

[46] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO_2 measurements[J]. Nature, 1996, 382(6 587): 146 – 149.

[47] 徐新良,曹明奎,李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究[J]. 地理科学进展, 2007, 26(6): 1 – 10. [Xu Xinliang, Cao Mingkui, Li Kerang. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetaion in China[J]. Progress in Geography, 2007, 26(6): 1 – 10.]

Changes of Carbon Storage and Carbon Density of Forests in the Kanas National Nature Reserve, Xinjiang

LI Yuan-yuan[1,2], WANG Lei[3], LIU Qi-jing[1], ZHOU Hua[4]

(1. *College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*;

2. *Department of Forestry, College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi* 832000, *Xinjiang, China*;

3. *Institute of Modern Forestry, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi* 830063, *Xinjiang, China*;

4. *Guizhou Academy of Forestry, Guiyang* 550000, *Guizhou, China*)

Abstract: In this paper, the equations were established for calculating the conversion between aboveground biomass and stem volume of main forest types by using the forest resources inventory data in 2009 and 2014 and the surveyed data of sample plots. On which the aboveground carbon storage and carbon density of the forests in the Kanas Nature Reserve were analyzed. The results showed that, in the 5 years from 2009 to 2014, the aboveground carbon storage in the Kanas Nature Reserve was about 2.14×10^6 Mg, and the average carbon density was decreased from 55.34 Mg · hm^{-2} to 54.61 Mg · hm^{-2}, while the forest area was enlarged by 496.77 hm^2. Among the carbon density changes of different forest types, the carbon densities of *Larix sibirica*, *Pinus sibirica* and *Populus tremula* forests were decreased, while those of *Picea oborata*, *Abies sibirica* and *Betula pendula* forests were increased. From 2009 to 2014, the carbon stocks of the mature forests was the highest and accounted for 63% of the total carbon storage in the arborous layer, and then that of post-mature, premature, middle-aged and young forests. The carbon density of the middle-aged forests was the highest (66.69 – 68.68 Mg · hm^{-2}), that of the young forests was low (40.99 – 44.55 Mg · hm^{-2}), and that of other tree-aged groups ranked as mature and post-mature forests > premature forest. In which the carbon density of middle-aged and premature forests of *L. sibirica*, *A. sibirica*, *P. oborata* and *B. pendula* was increased, but that of all other post-mature forests was decreased except for *P. sibirica* and *A. sibirica*. The compared results revealed that the carbon density of the arborous layer in the study area was higher than the national average level, and the carbon sequestration potential of the arid and semiarid areas in China is high.

Key words: forest; carbon storage; carbon density; carbon sequestration potential; Kanas National Nature Reserve; Xinjiang